

明挖隧道基坑施工数据监测分析与可视化信息管理系统

孙耀刚¹, 陈玉争¹, 肖飞¹, 薛德昊¹, 梁宸², 王楚鑫²

¹中建三局集团有限公司, 湖北 武汉

²中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2023年10月9日; 录用日期: 2023年11月15日; 发布日期: 2023年11月27日

摘要

明挖隧道基坑工程在当今隧道工程建设中愈发常见。本文依托徐州市和平路隧道工程项目, 实时监测基坑开挖与建设过程中桩顶竖向位移、桩顶水平位移、立柱竖向位移、地表沉降、建筑物沉降、支撑轴力, 并进行变形特性分析, 以确保基坑周围建筑物的安全。分析结果表明, 各测点监测数据波动变化, 但均未超出预警值。同时, 开发“和平路隧道信息管理系统”, 实时输入工程资料和监测数据, 并进行数据分析和风险评估, 实现工程信息的可视化管理。

关键词

基坑, 监测数据, 变形分析, 信息管理系统, 风险评估

Construction Data Monitoring and Analysis and Visualization Information Management System of Open-Cut Tunnel Foundation Pit

Yaogang Sun¹, Yuzheng Chen¹, Fei Xiao¹, Dehao Xue¹, Chen Liang², Chuxin Wang²

¹China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan Hubei

²School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Oct. 9th, 2023; accepted: Nov. 15th, 2023; published: Nov. 27th, 2023

Abstract

Open-cut tunnel foundation pit engineering is more and more common in tunnel construction no-

文章引用: 孙耀刚, 陈玉争, 肖飞, 薛德昊, 梁宸, 王楚鑫. 明挖隧道基坑施工数据监测分析与可视化信息管理系统[J]. 土木工程, 2023, 12(11): 1348-1361. DOI: 10.12677/hjce.2023.1211155

wadays. Based on the Heping Road tunnel engineering in Xuzhou City, this paper monitors the vertical displacement of pile top, horizontal displacement of pile top, vertical displacement of standing column, ground surface settlement, construction settlement and supporting axial force in the process of foundation pit excavation and construction in real time, and analyzes the deformation characteristics to ensure the safety of buildings around the foundation pit. The analysis results show that the monitoring data of each measuring point fluctuates, but does not exceed the warning value. At the same time, the "Heping Road tunnel information management system" is developed to input engineering information and monitoring data in real time, and carry out data analysis and risk assessment, so as to realize the visual management of engineering information.

Keywords

Foundation Pit, Monitoring Data, Deformation Analysis, Information Management System, Risk Assessment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着市政工程技术的发展,城市隧道等地下交通城建数量增多,规模增长[1] [2]。在进行城市地下空间作业前期,需要先进行开挖,明挖法是较为常用的方法。但开挖扰动会引起工程周围岩土应力重分布,产生地表沉降,对基坑及周围城市建筑的安全性和稳定性造成影响[3] [4] [5]。因此,有必要在施工过程中及时监测和检测,分析基坑变形特性,以确保工程的安全性。同时,可以借助信息技术,将监测数据整理汇总输入计算机并创建管理系统,进一步开发数据分析功能,实现信息的可视化管理[6] [7] [8]。

目前国内外学者针对城市明挖隧道基坑监测与变形特性分析展开了丰富的研究,也开发了部分基坑工程数据管理系统。谭鑫等[9]结合现场实测数据,并结合数值模拟方法,研究了在浅基础建筑物周围开挖深基坑导致的变形特征。Kim等[10]采用电阻率层析成像技术对基坑施工过程中地下地层的稳定性进行监测,分别在基坑开挖前、开挖后、松动区施工后进行了测量,并对基坑开挖附近扰动带单剖面进行了三维反演与二维反演时间推移的比较。刘波[11]结合上海国际金融中心超大体量卸载、超深开挖深度、超长降水周期的基坑工程实践,通过对邻近地层变形的信息化监测,研究在顺逆作同步交叉实施条件下上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层的时空位移特征,探讨其变形机理和影响因素。吴振君等[12]结合GIS技术,开发了基坑信息管理系统,并具有预警功能,实现了基坑监测的集成化、信息化、共享化。邢卫民等[13]对基坑监测信息进行工程化管理,实现了基坑工程信息的及时精确监测、分析和预测。

徐州市和平路隧道采用明挖法施工,明挖基坑周围紧邻西汉采石场遗址等大量历史文化建筑群。本文依托徐州市和平路隧道工程项目,根据现场施工过程中的监测数据对基坑受力情况和变形特性进行了分析,并创建“和平路隧道信息管理系统”,开发“数据输入、数据分析、风险评估”等一体化综合功能,实现监测数据的可视化管理。

2. 工程背景

2.1. 自然地理条件

工程选址区位于华北地台南边缘,有两条断裂带穿过:废黄河断裂带从场地东北约200 m处穿过;

F51 断裂(云龙山~洞山断层)从场地东侧约 50 m 处穿过。经工程勘测,这两个断裂均为非活动性断裂,对工程建设基本无影响,工程选址在区域地质上是稳定的。勘察资料显示,在勘察深度范围内,主要以杂填土、素填土、硬塑黏性土及中风化石灰岩为主。

工程区属华北半湿润、暖温带、季风气候区,具有长江、黄河流域间过渡性气候的特征。全年气候温和,四季分明。区内降雨时空极不均匀,年降雨量变化在 600~1219 mm 之间,由西向东递增。在调查深度内,地下水含水层主要由滞留水和基岩裂隙水组成。地下灰岩岩溶水的补给来源主要是暴露基岩区大气降水入渗补给、山前冲击平原区孔隙水越流补给和区外岩溶地下水侧向径流补给,不同季节年动态不同。

2.2. 工程概况

和平路隧道工程位于徐州市泉山区,路线起于和平路与中山南路交叉处,沿和平路向东止于云东路交叉口。场地北侧临近汉代采石场遗址、徐州市博物馆、乾隆行宫,南侧临近云龙山、东坡文化城。地势起伏较大,地貌单元类型属山前坡地,现地面标高 32.28~41.17 m,地势中间高东西两侧低。工程平面范围起于中山南路十字型交叉口东,终点止与云东路交叉口西,改造里程 480 m (K0+000~K0+480),其中隧道段长 162 m (K0+113~K0+275),西侧 U 型槽 25 m,挡土墙 62 m,路基段 26 m;东侧 U 型槽 25 m,挡土墙 45 m,路基段 135 m。和平路隧道采用明挖法施工,基坑深度为现地面下 5.5~12.5 m,采用钻孔灌注桩加内支撑进行支护。工程实景如图 1 所示。

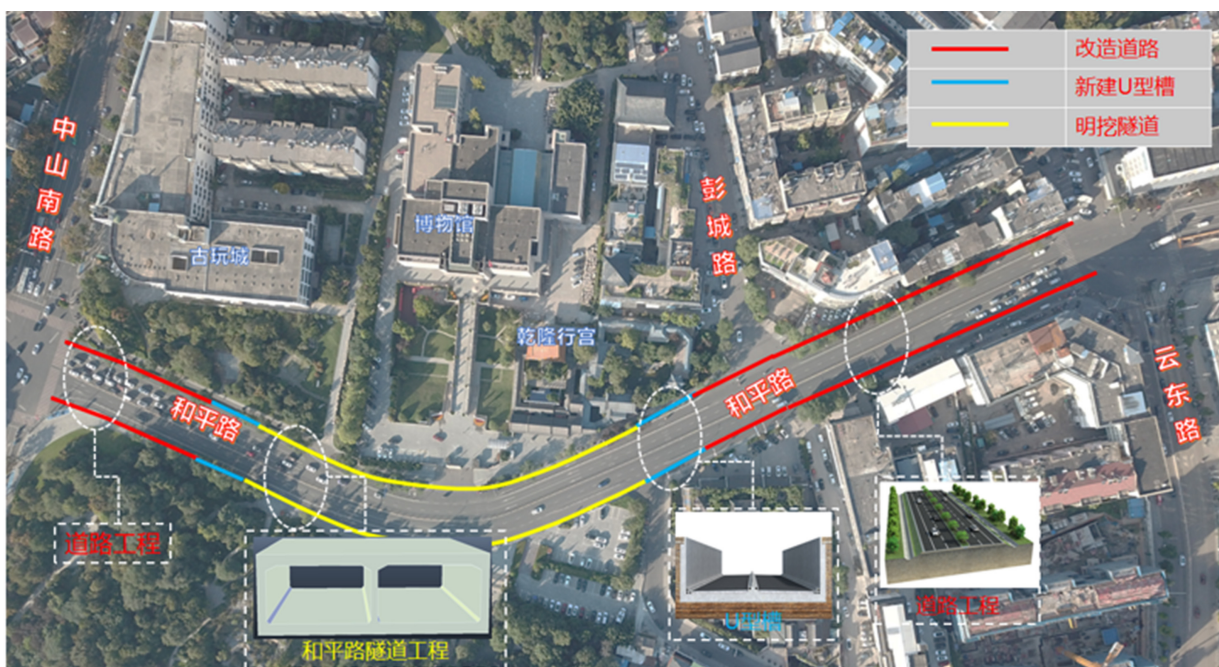


Figure 1. Heping Road tunnel foundation pit

图 1. 和平路隧道基坑

2.3. 基坑监测标准与布设

为了控制基坑工程及附属设施、周围建筑物等在施工过程中出现的异常情况,在施工过程中建立严格的监测网络,实施信息化施工,以方便及时调整施工技术,确保工程安全。监测项目[14]如表 1 所示,监测频率如表 2 所示,监测点布置如图 2 所示,图 2 中各注释序号的详细监测信息如表 3 所示。

Table 1. Monitoring project table
表 1. 监测项目表

监测项目	位置或监测对象	预警值	
		变化速率	累计值
桩顶竖向位移(ZQC)	围护桩上端部	4 mm/d	min (0.5% H, 30 mm)
桩顶水平位移(ZQS)	围护桩上端部	6 mm/d	min (0.7% H, 50 mm)
立柱竖向位移(LZ)	基坑内立柱中部	4 mm/d	min (0.5% H, 30 mm)
地表沉降(DBC)	基坑周边地面	5 mm/d	60 mm
建筑物沉降(JZ)	基坑周边须保护的建筑物	5 mm/d	60 mm
支撑轴力(ZCL)	冠梁支撑端部 1/3 处	70% 设计值	70% 设计值

注：H 为基坑深度，m。

Table 2. Monitoring frequency table
表 2. 监测频率表

施工阶段	开挖深度 ≤ 5 m	开挖深度 5~10 m	开挖深度 ≥ 10 m	底板浇筑后时间 ≤ 7 d	底板浇筑后时间 7~28 d	底板浇筑后时间 > 28 d
监测频率	1 次/1d	1 次/1d	2 次/1d	2 次/1d	1 次/1d	1 次/3d

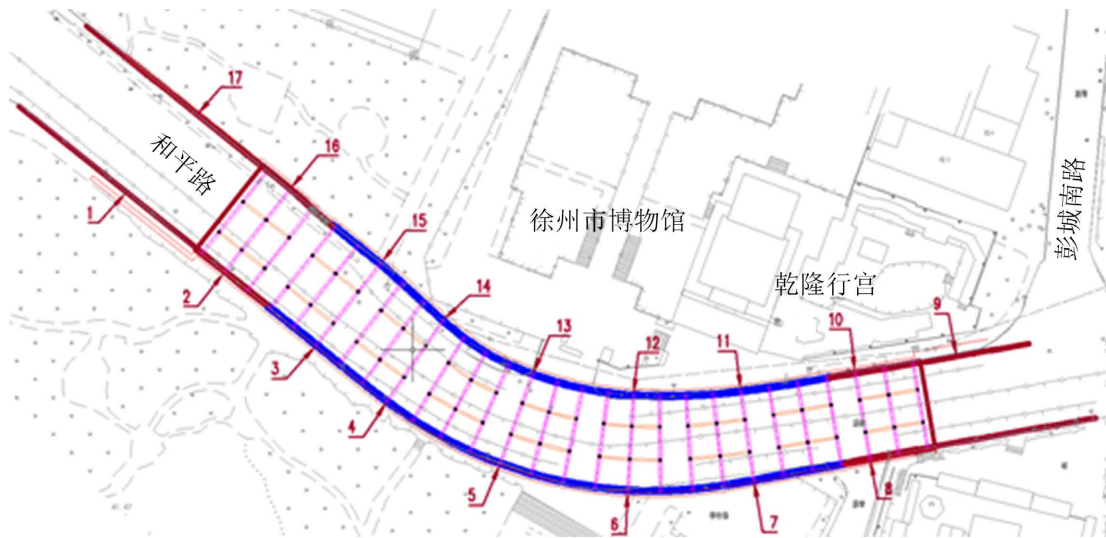


Figure 2. Location map of monitoring points
图 2. 监测点布设位置图

Table 3. Comment on detailed monitoring information for serial numbers
表 3. 注释序号的详细监测信息

注释序号	桩号	监测项目
1	K0 + 065	ZQC、LZ、DBC、ZCL
2	K0 + 100	ZQC、ZQS、LZ、DBC、ZCL
3	K0 + 130	ZQC、ZQS、LZ、DBC、ZCL
4	K0 + 160	ZQC、ZQS、LZ、DBC、ZCL
5	K0 + 180	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
6	K0 + 220	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
7	K0 + 250	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL

Continued

8	K0 + 280	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
9	K0 + 310	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ
10	K0 + 280	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ
11	K0 + 250	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
12	K0 + 220	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
13	K0 + 180	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
14	K0 + 160	ZQC、ZQS、LZ、DBC、ZCL
15	K0 + 130	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
16	K0 + 100	ZQC、ZQS、LZ、DBC、JZ、ZCL
17	K0 + 065	JZ

3. 动态监测与风险预警系统

3.1. 系统开发目的

为了有效控制现场实测数据，及时反馈数据信息和工程实况，以便结合实际工程进度进行数据分析和风险评估，开发了和平路隧道信息管理系统，实现大量工程数据的可视化管理。在施工过程中，能够周期性导入监测数据并对各项参数进行风险性评估，若发现风险点，及时对施工手段进行调整，以确保建构物的安全。

3.2. 系统基础

和平路隧道信息管理系统是基于 Visual Basic 软件开发的。Visual Basic 是一款基于 Windows 环境的编程软件，由微软公司开发，拥有强大的数据调用、文件管理等功能，自 1991 年问世以来就得到了广泛的应用，时至今日仍有相当多的从业者采用 VB 进行软件开发。

3.3. 系统总体设计

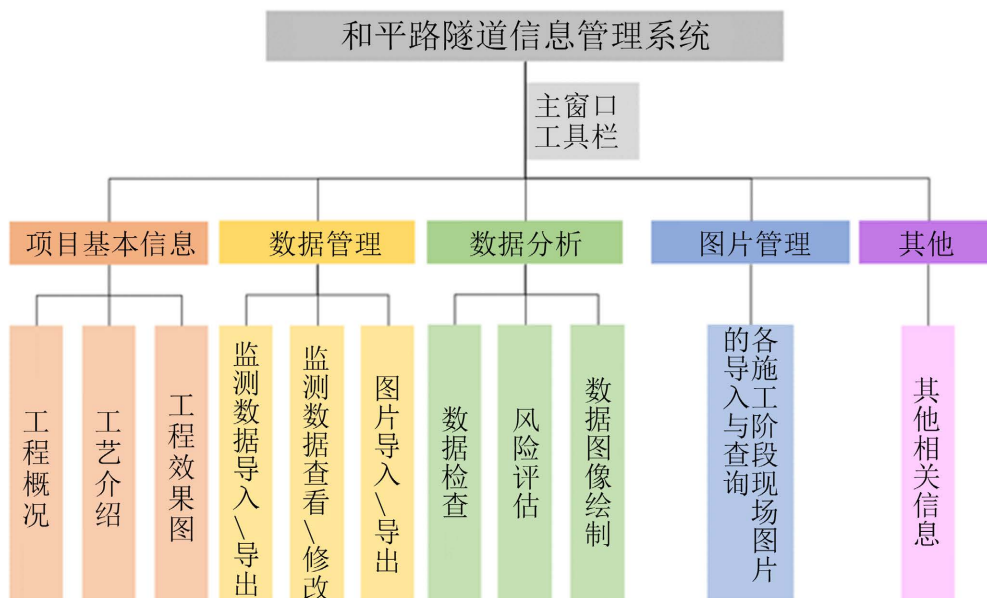


Figure 3. System architecture diagram
图 3. 系统构架图

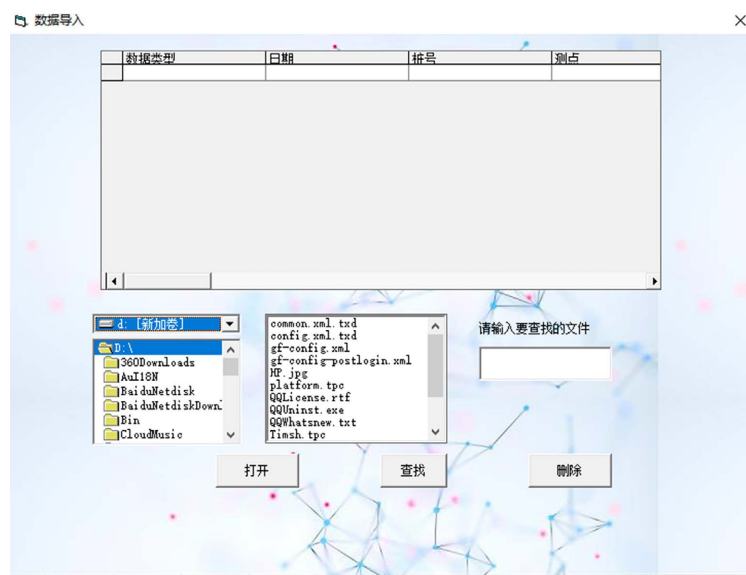
基于“整体性、精确性、及时性、友好性”的原则，系统页面设置和操作方法简单明了，使用方便，适用于多种身份的工程参与者。和平路隧道信息管理系统整体思路构架如图3所示。

3.4. 功能模块

主窗口工具栏是本系统的核心部分，包含“项目基本信息”、“数据管理”、“数据分析”、“图片管理”、“其他”这五个功能模块，其中“数据管理”和“数据分析”板块是对项目进行动态监测和风险预警的核心板块，对该板块进行简要介绍。

3.4.1. 数据管理

数据管理模块包含.xls格式文件数据的导入及导出，可导入单个数据或批量导入，同时也可以根据实际工程进展，导入过程中记录下的现场施工图片。在数据导入后，可对数据进行逐个查询或批量查询，也可以进行数据的逐个修改及批量修改，实现数据的系统化协同管理。数据管理相关操作页面如图4所示。



(a) 数据导入页面



(b) 数据批量修改页面

Figure 4. Data management module related pages
图4. 数据管理模块相关页面

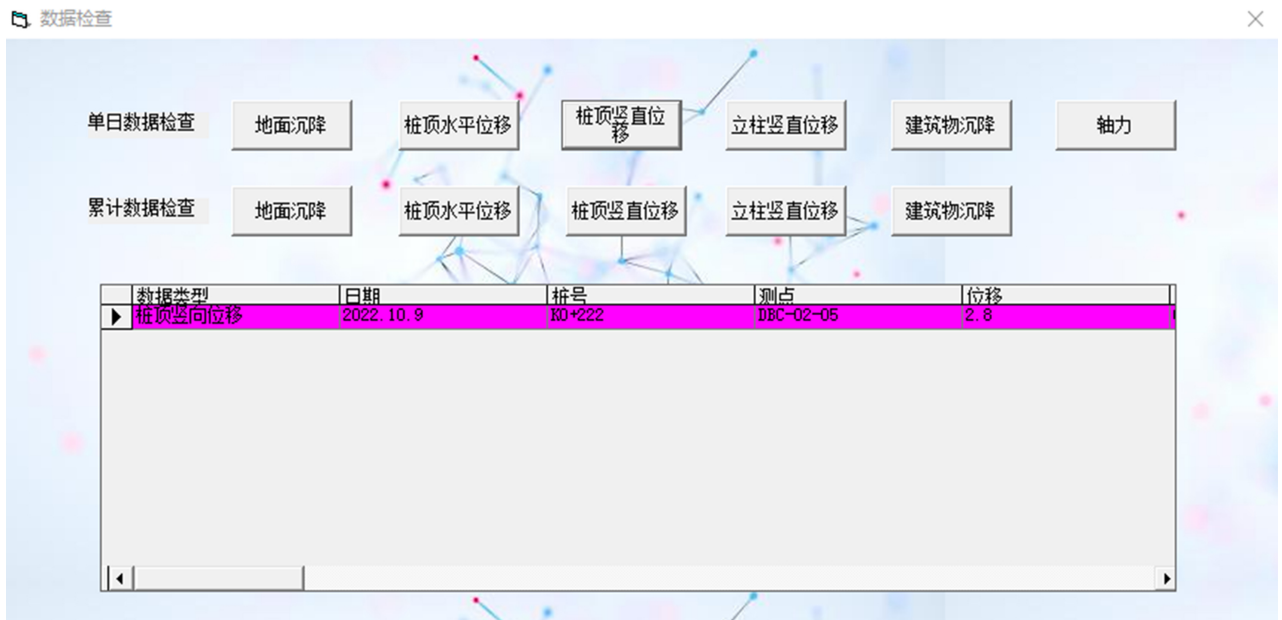
3.4.2. 数据分析

在数据管理模块的基础上，导入数据后，可以进行数据检查，包括单日最危险位移量检查、单日最危险内力检查、各测点累计变形量检查，呈现最危险监测点及对应的数值，并进行危险等级划分，从而进行风险评估，并采取及时的支持措施。依据相关国家规范[14]，综合考虑实际工况，参考风险管理领域内常用的四色风险划分[15] [16]，将基坑工程危险等级划分如表 4 所示，系统中数据检查和风险评估页面如图 5 所示。

Table 4. Risk grading classification
表 4. 风险等级划分

监测项目		蓝色	黄色	橙色	红色
地面沉降	单日(mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计(mm)	$X < 25$	$25 \leq X < 35$	$35 \leq X < 45$	$X \geq 45$
桩顶水平位移	单日(mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计(mm)	$X < 15$	$15 \leq X < 25$	$25 \leq X < 30$	$X \geq 30$
桩顶竖直位移	单日(mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计(mm)	$X < 5$	$5 \leq X < 10$	$10 \leq X < 20$	$X \geq 20$
立柱竖直位移	单日(mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计(mm)	$X < 5$	$5 \leq X < 10$	$10 \leq X < 20$	$X \geq 20$
建筑物沉降	单日(mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计(mm)	$X < 10$	$10 \leq X < 20$	$20 \leq X < 30$	$X \geq 30$

注：x 为各监测项目的单日变化量，X 为各监测项目的累计变化量。



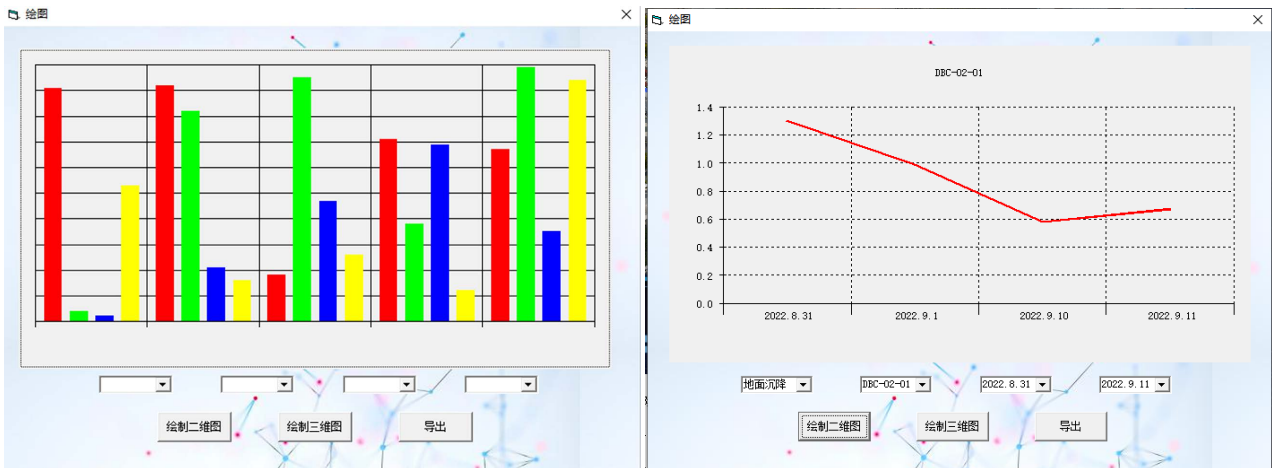
(a) 数据检查初始页面



(b) 红色风险等级及相关测点信息

Figure 5. Data check related pages
图 5. 数据检查相关页面

同时，数据分析模块还可以绘制二维或三维图像，呈现数据图像。实现各测点某时间段内监测数据的可视化分析。相关操作页面如图 6 所示。



(a) 图像绘制初始页面

(b) 二维图

Figure 6. Data image related pages
图 6. 数据图像相关页面

3.5. 风险预警功能实际应用

为确保基坑结构稳定性和施工安全性，实时监测围护桩和周围地表的应力、位移和变形情况，并借助自主开发的信息管理系统进行监测数据管理与分析，并对不同阶段土石方开挖扰动作用下的围护桩和周围地表动态响应情况划分预警等级，从而确保每一开挖阶段的监测数值在安全警戒值范围内，保证施工的顺利进行。

和平路隧道 信息管理系统 风 险 预 警 报 告

报告名称: 和平路隧道项目风险预警报告
 预警项目: 桩顶竖向位移
 预警类型: 单日最大值
 风险等级: 橙色风险等级
 日期: 2022年8月11日

和平路隧道信息管理系统制

Figure 7. One-day risk level report cover page
图 7. 单日风险等级报表封面

一、预警数据明细						
预警项目	日期	桩号	测点	位移 (mm/d)	内力 (KN)	风险等级
桩顶竖向位移	2022年8月11日	K0+222	DBC-02-05	2.7	0	橙色风险等级

二、风险等级划分					
监测项目		蓝色	黄色	橙色	红色
地面沉降	单日 (mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计 (mm)	$X < 25$	$25 \leq X < 35$	$35 \leq X < 45$	$X \geq 45$
桩顶水平位移	单日 (mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计 (mm)	$X < 15$	$15 \leq X < 25$	$25 \leq X < 30$	$X \geq 30$
桩顶竖直位移	单日 (mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计 (mm)	$X < 5$	$5 \leq X < 10$	$10 \leq X < 20$	$X \geq 20$
立柱竖直位移	单日 (mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计 (mm)	$X < 5$	$5 \leq X < 10$	$10 \leq X < 20$	$X \geq 20$
建筑物沉降	单日 (mm/d)	$x < 1$	$1 \leq x < 2$	$2 \leq x < 3$	$x \geq 3$
	累计 (mm)	$X < 10$	$10 \leq X < 20$	$20 \leq X < 30$	$X \geq 30$

Figure 8. One-day risk level report content
图 8. 单日风险等级报表内容

如图 7、图 8 所示,在第三层土石方开挖时发现 K0+222 桩的桩顶竖向位移值达到了橙色风险等级,属于较高风险预警值,故在开挖过程中及时调整,降低了爆破开挖强度和范围,以保护围护桩和周围环境,实现了施工监测数据的智能化管理和施工过程的实时调控。

4. 整体数据监测结果与变形特性分析

在施工完成后,对整体监测数据进行综合分析,验证施工手段的可靠性并总结相应规律。由于受到施工、气候、仪器等因素的影响,出现了监测仪器损坏或监测数据遗失等意外情况,因此选取较为全面的数据组进行分析。

4.1. 桩顶竖向位移

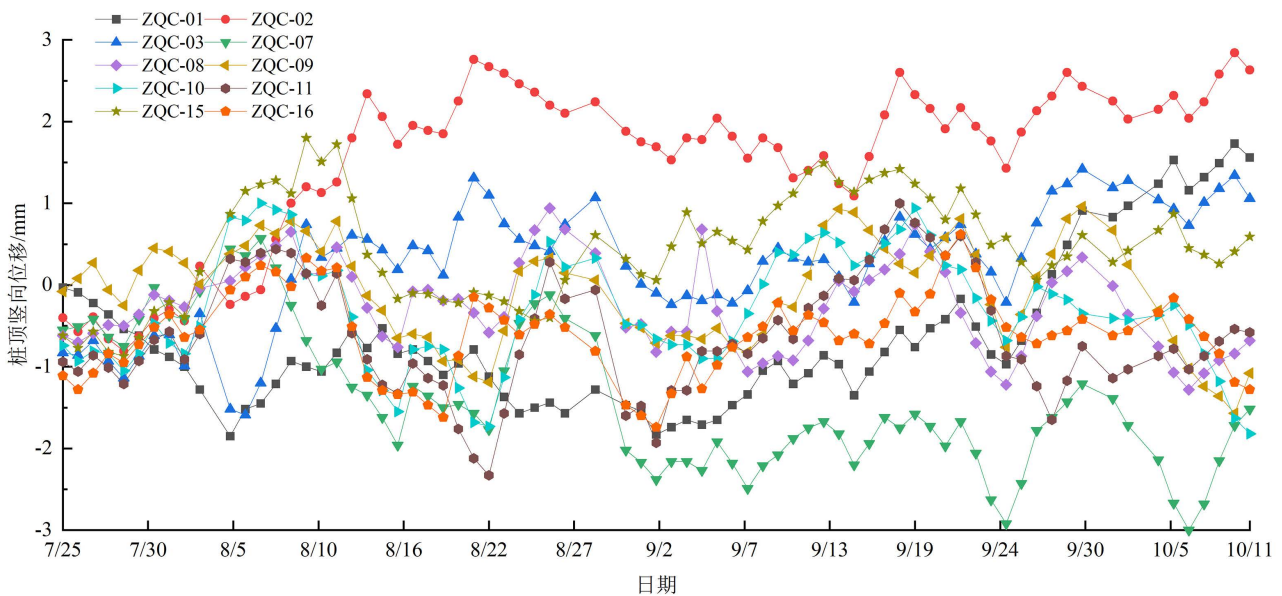


Figure 9. Time history curve of vertical displacement of pile top
图 9. 桩顶竖向位移时程曲线

根据监测数据作出桩顶竖向位移时程曲线,如图 9 所示,正值表示上升,负值表示下降。由图可知,随着工程的进行和时间的推移,曲线分布密集度降低,基坑周围各桩顶均出现不同程度的竖向位移,但位移变化速率和累计值均不超过预警值,在安全范围内。监测时段内竖向位移整体呈波动变化,变化最大的是 ZQC-02 和 ZQC-07 测点,ZQC-02 有最大的竖直向上位移,为 2.84 mm; ZQC-07 有最大的竖直向下位移,为 3 mm。

4.2. 桩顶水平位移

根据监测数据作出桩顶水平位移时程曲线,如图 10 所示,正值表示往基坑外,负值表示往基坑内。在监测时段内,各测点普遍出现大幅度水平位移波动,但均未超出位移变化速率和累计值的预警值。ZQS-08 测点出现过最大的向外水平位移,为 4.8 mm,随后出现最大幅度的反向水平位移,向基坑内位移 7.7 mm; ZQS-15 测点出现过最大的向内水平位移,为 3.7 mm,随后出现最大幅度的反向水平位移,向基坑外位移 7.3 mm。总体看来,基坑内部范围内的测点变化幅度较小,基坑两端测点的变化幅度较大。

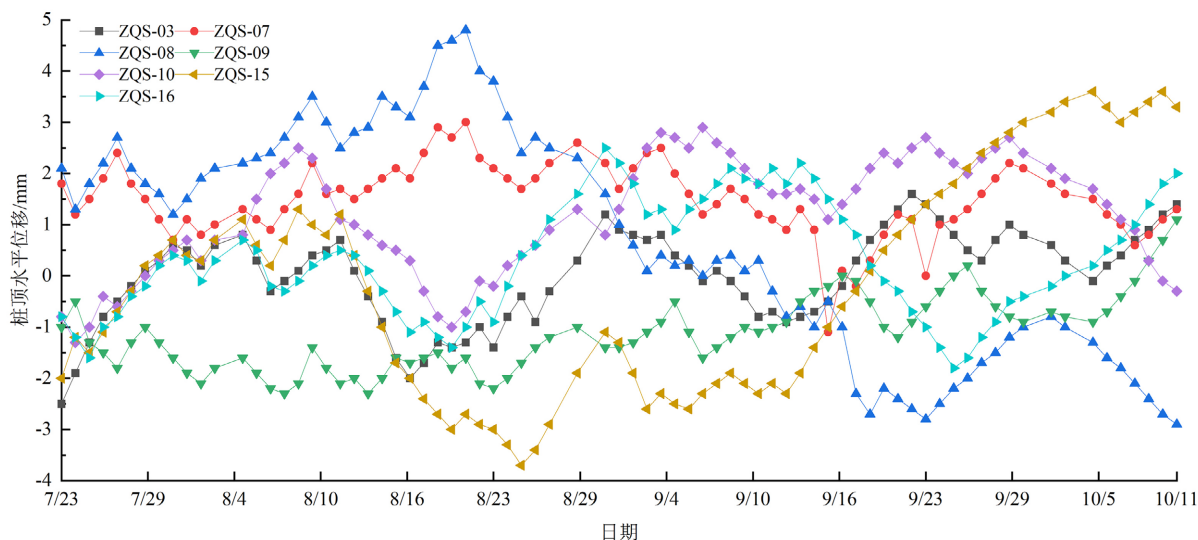


Figure 10. Time history curve of horizontal displacement of pile top

图 10. 桩顶水平位移时程曲线

4.3. 立柱竖向位移

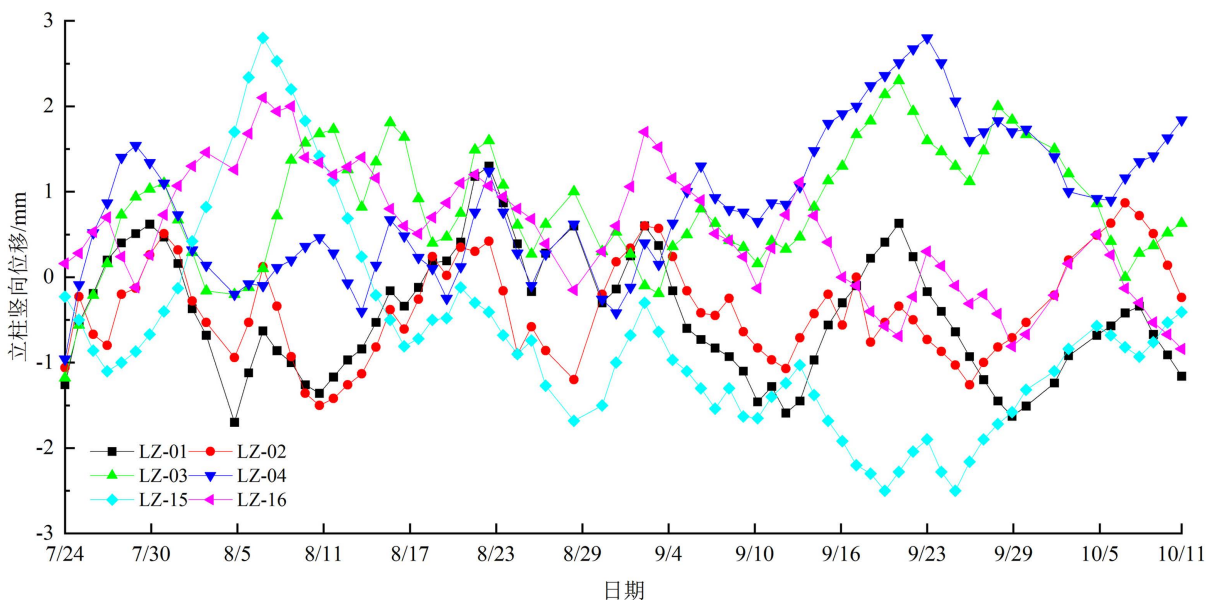


Figure 11. Time history curve of vertical displacement of column

图 11. 立柱竖向位移时程曲线

根据监测数据作出立柱竖向位移时程曲线，如图 11 所示，正值表示上升，负值表示下降。在监测时段内各测点均有大幅竖向位移，推测是由于工程扰动引起。在基坑开挖过程中，是先向地下岩石中打入立柱以支撑冠梁，将支撑结构构建完备后再开挖下部岩石。岩石紧紧环绕立柱，静态爆破开挖岩石造成扰动，带动立柱大幅产生竖向位移。两向最大竖向位移均在 LZ-15 测点处产生，向上最大 2.8 mm，向下最大 2.5 mm，LZ-15 测点也是整体变化幅度最大的测点。但经过监测，立柱竖向位移变化均不超出安全警戒值，符合国家安全标准。

4.4. 地表沉降

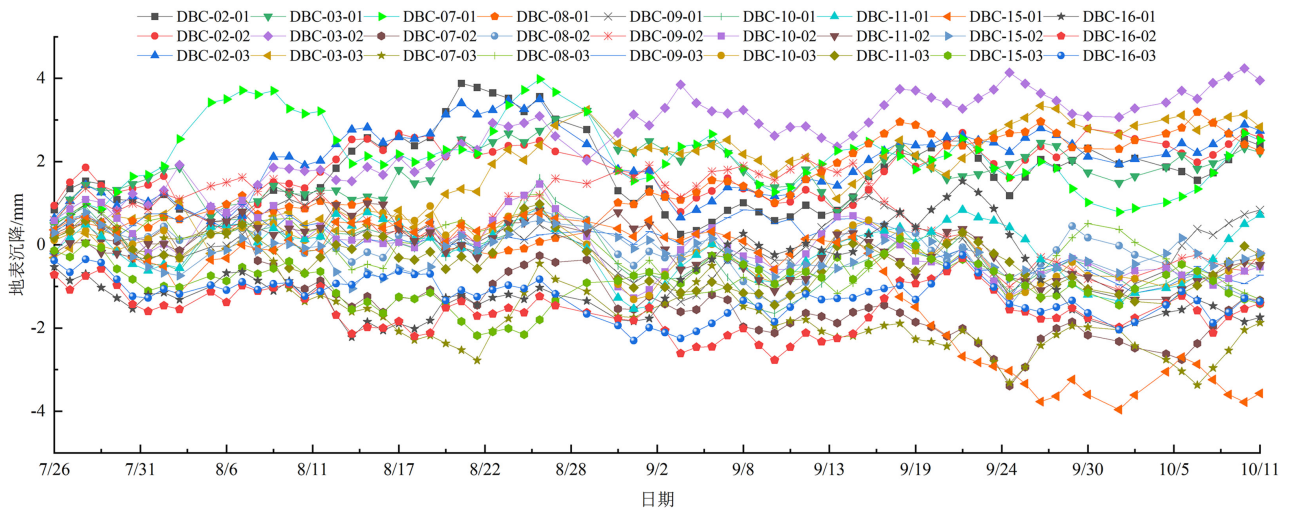


Figure 12. Time history curve of surface settlement

图 12. 地表沉降时程曲线

根据监测数据作出地表沉降时程曲线，如图 12 所示，正值表示隆起，负值表示下降。在监测时段内地表变化平缓且均匀，以下降为主，少部分测点处有隆起现象，整体不超出安全警戒值。隆起最多的测点是 DBC-10-02，隆起值为 4.24 mm；下降最多的测点是 DBC-15-01，下降值为 3.96 mm。

4.5. 建筑物沉降

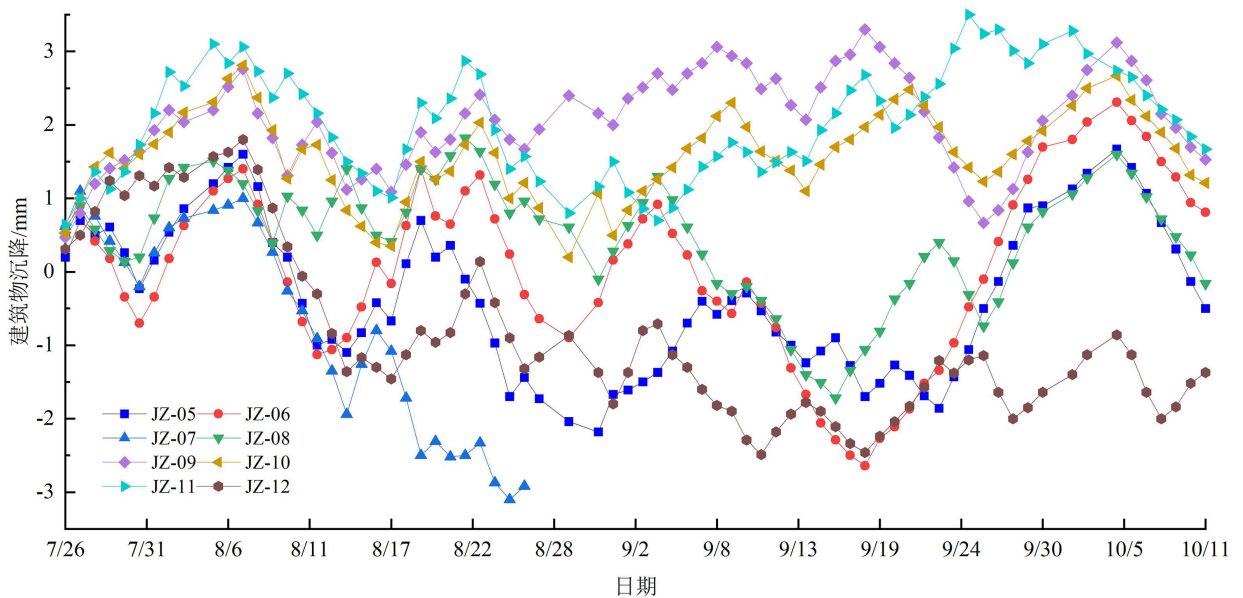


Figure 13. Time history curve of building settlement

图 13. 建筑物沉降时程曲线

根据监测数据作出建筑物沉降时程曲线，如图 13 所示，正值表示上升，负值表示下降。JZ-07 监测点在后期遭到破坏，故监测曲线中断。监测时段内基坑周围建筑物出现较大幅度的沉降位移波动，但均

未超出沉降位移变化速率和累计值预警值。在 8 月 17 日之前和 9 月 30 日之后, 测点走向基本一致, 中间段曲线走向波动较大, 推测是由于该时段内施工扰动所致。JZ-07 测点处建筑物有最大的累计沉降量, 达 3.1 mm; JZ-11 测点处建筑物有最大的累计上升量, 达 3.5 mm。

4.6. 支撑轴力

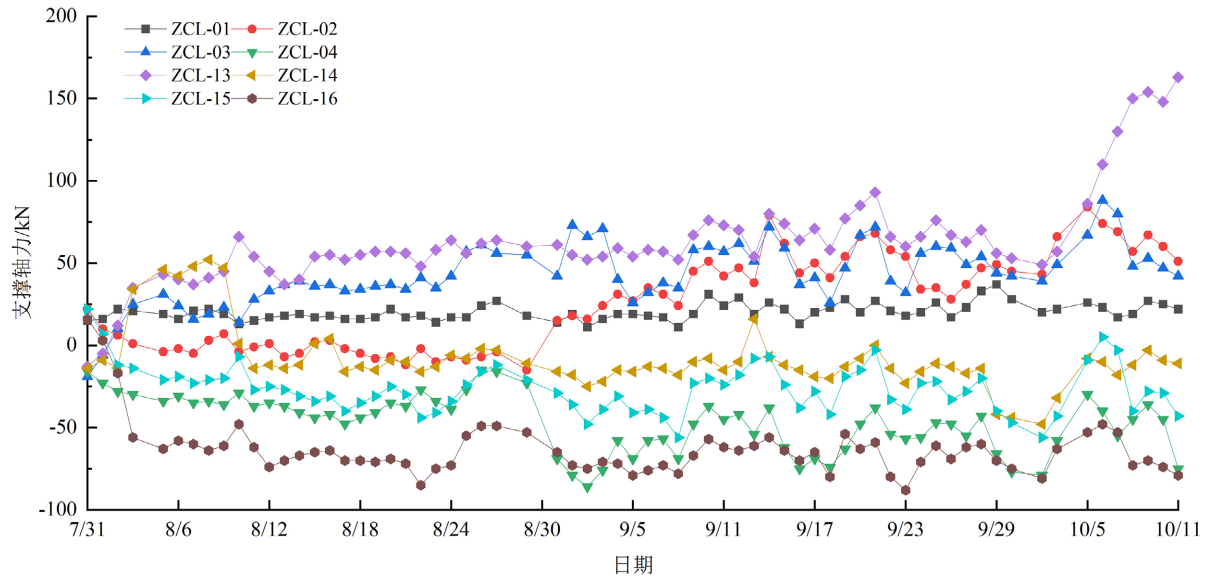


Figure 14. Time history curve of support axial force
图 14. 支撑轴力时程曲线

根据监测数据作出支撑轴力时程曲线, 如图 14 所示, 正值表示受拉, 负值表示受压。整体看来, 支撑轴力变化平缓均匀, 在 ± 88 kN 范围内波动变化, 最大单次变化量不超过 46 kN, 变化速率和累计值均不超过预警值。唯有 ZCL-13 测点在后期出现较大的支撑拉力, 在监测时段内达 163 kN, 且有持续上升的趋势, 应在后续继续监测并关注。

5. 结论

本文依托徐州市和平路隧道项目, 其明挖基坑周围紧邻西汉采石场遗址、徐州市博物馆等大量历史和文化建筑群。为保障周边历史文化建筑物的稳定性和安全性, 在基坑施工过程中的桩顶竖向位移、桩顶水平位移、立柱竖向位移、地表沉降、建筑物沉降、支撑轴力进行实时监测, 分析基坑变形特性, 并与国家规范的预警值相对比。同时, 由于监测数据的庞大性, 开发了“和平路隧道信息管理系统”, 依靠系统进行数据的记录, 并将数据进行图像化处理, 直观反映各监测项目的变化趋势。此外, 还可以进行风险等级划分与评估。

开发的“和平路隧道信息管理系统”, 基于“整体性、精确性、及时性、友好性”的原则, 实现了项目资料和数据的可视化管理。系统可详细记录工程概况和不同施工阶段的现场实拍图, 还可以输入施工过程中大量的监测数据。系统对功能进一步开发, 可以迅速提取各监测项目在既有数据中的最高危险值, 并进行风险评估, 方便施工管理人员及时有效地把控工程安全; 同时, 可以将监测数据呈现为二维或三维图像, 有利于对基坑变形特性进行分析与预测。系统操作界面直观简约, 适用于各类身份的工程参与者。

监测数据表明, 在基坑施工过程中, 各监测点一直受到施工的扰动, 呈现不规则的波动变化。但变

化速率和累计变化量均不超过规范中的预警值，因此工程符合施工要求，有效保障了基坑周围建筑群的安全性。

参考文献

- [1] 张俊杰, 高林静, 范兆东, 等. 洛阳龙门地铁站狭长深基坑变形规律及控制措施分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 59-66+8-9.
- [2] 徐健, 王自强, 王林枫, 等. 既有建筑下半盖挖深基坑变形影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1696-1704+1713.
- [3] 徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(z1): 41-44.
- [4] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36+201.
- [5] 刘松玉, 李洪江, 童立元, 等. 地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1329-1338.
- [6] 胡偲. 大型深基坑变形管理等级及信息管理系统研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [7] 张凤瑞, 张磊. GIS 技术下天津市深基坑监测信息管理系统的设计与实现[J]. 测绘通报, 2016(7): 118-121.
- [8] 高磊, 孙阳阳, 濮慧蕾, 等. 基坑监测信息管理系统的设计与实现[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2): 1984-1988.
- [9] 谭鑫, 任亚坤, 周苏华, 等. 近邻浅基础建筑物深基坑变形特征的实测及数值分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 657-665.
- [10] Kim, B., Joung, I., Cho, A., *et al.* (2022) Monitoring the Perturbation Zone near a Foundation Excavation with Electrical Resistivity Tomography: Comparison between Time-Lapse 3D and 2D Inversions in Single-Profile Study. *Journal of Applied Geophysics*, **205**, Article ID: 104772. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104772>
- [11] 刘波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1950-1958.
- [12] 吴振君, 王浩, 王水林, 等. 分布式基坑监测信息管理与预警系统的研制[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2503-2507+2514.
- [13] 邢卫民, 侯金波, 张敏, 等. 基坑监测信息管理系统的设计与实现[J]. 测绘通报, 2012(4): 71-74.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50497-2019. 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [15] 贺雄宙. 风险指数在浦东新区世博餐饮食品安全监管中的应用与分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [16] 魏佳男, 覃佐亚, 刘冠业, 等. 煤矿安全风险分级防控四色图绘制及探讨[J]. 采矿技术, 2021, 21(z1): 60-62.